

Voimajohtojen sähkökentät

Lauri Puranen

Voimajohtojen sähkökentät

Lauri Puranen

ISBN 978-952-309-375-1 (pdf)
ISSN 1796-7171

PURANEN Lauri. Voimajohtojen sähkökentät. STUK-TR 25. Helsinki 2017. 30 s.

Avainsanat: voimajohto, sähkökenttä, altistuminen, väestö, säteilylainsäädäntö

Tiivistelmä

Sähköä siirretään pitkiä matkoja suurjännitteisillä sähköjohdoilla eli voimajohdoilla. Voimajohtojen jännite on 110 kV, 220 kV tai 400 kV (kV on 1 000 voltia). Jännite voi siten olla jopa tuhatkertainen kuluttajien käytössä olevaan 400 V pienjännitteeseen verrattuna. Suomessa on voimajohtoja yhteensä noin 22 500 km, josta 400 kV voimajohtoja on noin 4 800 km.

Voimajohdot synnyttävät ympärilleen sähkö- ja magneettikentän. Sähkökentän voimakkuus riippuu voimajohdon jännitteestä ja magneettikentän voimakkuus voimajohdon virrasta. Käytännössä voimakkaimmat sähkökentät, joille väestö voi elinympäristössä altistua, sijaitsevat 400 kV voimajohtojen alla. Siellä voi monin paikoin ylittyä merkittävän ajan kestäväälle väestön altistumiselle sovellettava sähkökentän suositusarvo 5 kV/m, joka on vahvistettu ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistumisen rajoittamisesta annetussa sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa (294/2002). Sitä vastoin magneettikenttä on selvästi väestön suositusarvoa pienempi myös 400 kV voimajohtojen alla. Satunnainen altistuminen 5 kV/m ylittävälle sähkökentälle ei ole terveydelle haitallista, mutta voi tuntua epämiellyttävältä. Näin voimakas sähkökenttä liikuttaa ihokarvoja, mikä voi ärsyttää ihoa. Lisäksi se varaa maasta eristetyin metalliesineen, esimerkiksi auton korin, jota kosketettaessa saattaa syntyä kivulias kipinäpurkaus. Kehon sisäiset lääkinnälliset laitteet, kuten sydämentahdistimet, saattavat häiriintyä alle 5 kV/m sähkökentän voimakkuuksilla.

Säteilylainsäädäntöä ollaan uudistamassa, ja sen yhteydessä esitetään myös pientaajuisille sähkö- ja magneettikentille väestön altistuksen raja-arvoja. Kenttien raja-arvot on asetettava siten, että ne suojaavat väestöä terveydellisiltä haittavaikutuksilta. Raja-arvoja asetettaessa on huomioitava, miten niitä sovelletaan yhteiskunnan kannalta tärkeässä sähkönsiirrossa ja -jakelussa. Lainsäädännön uudistustyötä varten voimajohtojen aiheuttamia sähkökentän voimakkuuksia selvitettiin Säteilyturvakeskuksen (STUK) toteuttamassa projektissa laskemalla ja mittaamalla.

Tässä raportissa esitetään voimajohtojen sähkökentän laskenta- ja mittausten menetelmät sekä laskelmien ja mittausten tulokset. Sähkökentän voimakkuudet laskettiin johtimien korkeuden funktiona maasta. Laskennassa huomioitiin myös ilmajohtostandardien vaatimat vähimmäiskorkeudet. Nämä vastaavat käytännössä tilanteita, joista aiheutuu olemassa olevien johtojen osalta suurimmat sähkökentän voimakkuudet. Myös erilaisten pylväsrakenteiden vaikutusta sähkökentän voimakkuuteen selvitettiin. Vikatilanteiden aiheuttamia sähkökentän voimakkuuksia ei laskettu, koska nämä on huomioitu kattavasti ilmajohtostandardeissa. Mittauksilla tutkittiin eri tekijöiden vaikutusta sähkökentän voimakkuuden mittaustulokseen ja selvitettiin mittapään paras asettelu luotettavien

mittaustulosten saamiseksi. Laskenta- ja mittaustuloksia verrattiin Tampereen teknillisen yliopiston aiemmin tekemien laskelmien ja mittausten tuloksiin.

Laskenta- ja mittaustulosten mukaan väestön suositusarvo 5 kV/m ylittyy monin paikoin 400 kV voimajohtojen alla, mutta ei johtoauean ulkopuolella. Sitä vastoin suositusarvo 5 kV/m ei ylity muiden voimajohtojen alla. Suurimmat 220 kV voimajohtojen alla lasketut sähkökentän voimakkuudet ovat lähellä 5 kV/m. Laskentatulosten mukaan ilmajohtostandardin sallimat alimmat johdinkorkeudet rajaavat 400 kV voimajohtojen alla suurimmaksi sähkökentän voimakkuudeksi noin 10 kV/m. Näin suuria sähkökenttiä on joissakin yksittäisissä paikoissa, joissa väestö oleskelee vain satunnaisesti. Yli 10 kV/m sähkökentän voimakkuuksia ei ole mitattu 400 kV voimajohtojen alla. Ilmajohtostandardien noudattaminen estää terveydelle haitallisten sähkökenttien syntyminen voimajohtojen alle.

PURANEN Lauri. *Electric fields of power lines. STUK-TR 25. Helsinki 2017. 30 pp.*

Key words: power line, electric field, exposure, general public, radiation legislation

Abstract

Electrical energy is transmitted along large distances with high-voltage transmission lines, i.e., power lines. The operating voltage of the power lines is 110 kV, 220 kV or 400 kV (kV is 1000 volts). Thus, the voltage can be thousand times in comparison with the 400 V low voltage used by the consumers. The total length of the power lines in Finland is about 22 500 km, of which the length of 400 kV power lines is about 4800 km.

The power lines generate electric and magnetic fields around them. The electric field strength depends on the operating voltage and the magnetic field strength on the current of the conductors. In practice, the strongest electric fields which general public can be exposed to in the living environment are located below 400 kV power lines. There the electric field exceeds at many places the recommended maximum value 5 kV/m applied to the exposure lasting a significant time. The maximum value 5 kV/m has been ratified in the Decree of the Ministry of Social Affairs and Health on the limitation of the general public exposure to non-ionizing radiation (294/2002). On the contrary, the magnetic field is clearly lower than the recommended maximum value for general public also below 400 kV power lines. The exposure to the electric field exceeding 5 kV/m is not harmful to health but can be uncomfortable. Such a strong electric field moves body hairs which may irritate the skin. In addition, it recharges a metallic object isolated from the ground, for example the body of a car, and a painful spark discharge may occur when the object is touched. Implantable medical devices, such as cardiac pace-makers, may experience interferences when exposed to electric field strengths of less than 5 kV/m.

The reform of the radiation legislation is in progress, and in this connection exposure limit values will be presented also for low-frequency electric and magnetic fields. The limit values have to be set so that they protect general public from the harmful effects due to the exposure to the fields. When setting the limit values attention has to be paid on how to apply them to the transmission and distribution of electrical energy which are vital for the society. For the reformatory legislative work, the electric field strengths generated by the power lines in their vicinity were studied by carrying out calculations and measurements in a project conducted by STUK.

The calculation and measurement methods, the results obtained from the calculation and measurements of the project are presented in this report. The electric field strengths were calculated as a function of the height of the conductors from the ground. The minimum clearance between the energized conductors and the ground required by the overhead line standards were also taken into account in the calculations. In practice, the minimum clearance corresponds to situations in which the highest electric field strengths are caused by the existing power lines. The effect of different pole structures on the electric field strength was also studied. The electric field strengths caused by faulty states were not calculated because they have been taken into account in the overhead line standards.

The effect of different factors on the measurement result of the electric field strength was studied with measurements and the best setup of the probe was found out to obtain reliable measurement results. The calculation and measurement results were compared with the results obtained from the calculations and measurements carried out earlier by the Tampere University of Technology.

According to the calculation and measurement results the maximum value 5 kV/m recommended for general public is exceeded at many places below 400 kV power lines but not outside the wire zone. On the contrary, it is not exceeded below other power lines. The maximum calculated electric field strengths below 220 kV power lines are near to 5 kV/m. According to the calculation results the highest electric field strength below 400 kV power lines is limited to around 10 kV/m by the minimum heights of the conductors required by the overhead line standards. Such strong electric fields exist at some separate places where general public stays only occasionally. Electric field strengths exceeding 10 kV/m have not been measured below 400 kV power lines. Compliance with the overhead line standards prevents the generation of hazardous electric fields below power lines.

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	5
1 JOHDANTO	9
2 PIENTAAJUISEN SÄHKÖKENTÄN VOIMAKKUUDEN OHJEARVOJEN PERUSTEET	11
3 VOIMAJOHTOJEN SÄHKÖKENTÄN VOIMAKKUUDEN LASKENTA	12
3.1 Laskentakaavat	13
3.2 Laskettuja sähkökentän voimakkuuksia erilaisille voimajohdoille	14
3.2.1 400 kV portaali johto	14
3.2.2 400 kV kaksoisjohto	15
3.2.3 110 kV portaali johto	18
3.2.4 110 kV kaksoisjohto	18
3.3 Laskentatulosten tarkastelua	18
4 VOIMAJOHTOJEN SÄHKÖKENTÄN VOIMAKKUUDEN MITTAUKSET	20
4.1 Mittausmenetelmä	20
4.2 Mittaustulokset	21
4.2.1 Mittauspaikka 1	21
4.2.2 Mittauspaikka 2	24
4.2.3 Kasvillisuuden vaikutus mittaustulokseen	24
4.3 Tampereen teknillisen yliopiston tekemät voimajohtojen sähkökentän mittaukset	24
4.4 Sähkökentän voimakkuuden mittauksen epävarmuus	25
4.5 Mittausten tarkastelua	26
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	28
6 KIRJALLISUUSVIITTEET	29

1 Johdanto

Nykyinen yhteiskunta kuluttaa sähköä asunnoissa, liikekeskuksissa ja teollisuudessa. Sähköä kulutetaan siten yleensä kaukana voimalaitoksista, joissa sähköä tuotetaan. Tämän vuoksi sähköä joudutaan siirtämään pitkiäkin matkoja, mikä vaatii erikoistekniikkaa. Siirtohäviöiden pienentämiseksi sähkö siirretään suurjännitteisillä (110 kV, 220 kV ja 400 kV) sähköjohdoilla eli voimajohtojilla. Niiden jännite voi siten olla tuhatkertainen verrattuna kuluttajien käyttämään 400 V pienjännitteeseen. Koska sähkökentän voimakkuus on suoraan verrannollinen jännitteeseen, voimajohto voi aiheuttaa ympärilleen tuhatkertaisen sähkökentän voimakkuuden pienjännitteiseen johtoon verrattuna. Voimajohtot aiheuttavatkin siten suurimmat sähkökentät, joille väestö voi elinympäristössä altistua. Suomessa on voimajohtoja yhteensä noin 22 500 km, josta 400 kV voimajohtojen osuus on noin 4 800 km.

Voimajohtot synnyttävät ympärilleen sähkö- ja magneettikentän. Sähkökentän voimakkuus riippuu voimajohdon jännitteestä ja magneettikentän voimakkuus johtimien virroista. Sähkö- ja magneettikentän voimakkuudet pienenevät nopeasti voimajohdoista kauemmaksi mentäessä. Kasvillisuus ja talojen rakenteet vaimentavat sähkökenttää mutta eivät magneettikenttää. Siten voimajohtojen sähkökenttä ei tunkeudu talojen sisään kuten magneettikenttä. Sähkökentän voimakkuus voi ylittää 400 kV voimajohdon alla väestön suositusarvon 5 kV/m, mutta magneettivuon tiheys ei ylitä väestön suositusarvoa 100 μ T voimajohdon allakaan. Tyypillisesti sähkökentän voimakkuus on 400 kV voimajohdon alla 1–10 kV/m, 110 kV voimajohdon alla 0,2–3 kV/m ja 20 kV avojohdon alla 0,02–0,1 kV/m (Korpinen ym. 1995). Kodin sähkölaitteet aiheuttavat käyttöetäisyydellä sähkökentän voimakkuuden 0,01–0,1 kV/m. Keskimääräinen sähkökentän voimakkuus on noin 0,01 kV/m asunnoissa, joissa on sähköjohtoja ja -laitteita.

Väestön altistumista sähkömagneettisille kentille rajoitetaan sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa 294/2002 annetuilla suositus- ja enimmäisarvoilla (STMa 2002). Enintään 100 kHz taajuisille sähkö- ja magneettikentille on annettu suositusarvot ja suuremmille taajuuksille velvoittavat enimmäisarvot. Voimajohtojen sähkökentän voimakkuuden suositusarvo on 5 kV/m, kun altistuminen kestää merkittävän ajan, ja 15 kV/m, kun se ei kestä merkittävää aikaa. Kestoajaltaan merkittäväksi altistumiseksi ei katsota mm. ulkoilua, marjastusta, sienestystä eikä maa- ja metsätaloustöiden tekemistä voimajohtojen läheisyydessä. Kestoajaltaan merkittävän altistumisen suositusarvo 5 kV/m perustuu kansainvälisen ionisointimattoman säteilyn komission (ICNIRP) julkaisemiin ohjearvoihin vuodelta 1998 (ICNIRP 1998). ICNIRP julkaisi uusimmat pientaajuisten kenttien ohjearvot vuonna 2010 (ICNIRP 2010), jotka ovat voimajohtojen sähkökentän voimakkuuden osalta samat kuin aiemmat ohjearvot.

Säteilylainsäädäntöä ollaan uudistamassa, ja samalla on tarkoitus uudistaa asetusta 294/2002 muun muassa pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien osalta. Suositusarvot muutettaisiin velvoittaviksi enimmäisarvoiksi, jotta voidaan tehokkaammin valvoa muiden pientaajuisia sähkö- ja magneettikenttiä hyödyntävien sovellusten käyttöä. Velvoittavat enimmäisarvot on asetettava siten, että ne suojaavat väestöä kenttien terveydellisiltä haittavaikutuksilta. Toisaalta raja-arvojen soveltamisen ei tulisi tarpeettomasti vaikeuttaa yhteiskunnan kannalta tärkeitä toimintoja, kuten sähkönsiirtoa ja -jakelua. Erityisesti on tarkasteltava sähkökentän enimmäisarvoja, sillä ICNIRPin ohjearvo 5 kV/m väestön altistumiselle ylittyy monin paikoin 400 kV voimajohtojen alla. Magneettikentän osalta ICNIRPin ohjearvot väestön altistumiselle eivät ylitä voimajohtojen alla. Lisäksi on selvitettävä, millaiselle tasolle ilmajohdostandardi rajoittaa sähkökentän voimakkuuksia

voimajohtojen alla.

Säteilylainsäädännön valmistelua varten suunniteltiin ja toteutettiin vuonna 2016 Säteilyturvakeskuksen (STUK) sisäinen projekti, jossa selvitettiin sähkökentän voimakkuuksia voimajohtojen läheisyydessä. Sähkökentän voimakkuuden määrittämistä varten kehitettiin laskentaohjelmisto ja mittaustekniikkaa. Projektin tarkoituksena oli myös luoda STUKiin valmius mitata voimajohtojen sähkökentän voimakkuuksia. Tässä raportissa selostetaan sähkökentän voimak-

kuuden laskentamenetelmän ja mittaustekniikan kehitystyötä ja sen tuloksia. Luvussa 2 esitetään perusteet ICNIRPin vuonna 2010 antamille sähkökentän voimakkuuden suositusarvoille. Luvussa 3 kuvataan voimajohtojen aiheuttaman sähkökentän voimakkuuden laskentaa ja luvussa 4 sähkökentän voimakkuuden mittauksia sekä esitetään vertailu Tampereen teknillisen yliopiston aiemmin tekemiin laskelmiin ja mittauksiin voimajohtojen sähkökentistä. Laskennan ja mittausten johtopäätökset esitetään luvussa 5.

2 Pientaajuksen sähkökentän voimakkuuden ohjearvojen perusteet

ICNIRPin vuoden 2010 ohjearvojen (ICNIRP 2010) perustana ovat hyvin tunnetut pientaajuksen sähkö- ja magneettikentän suorat biofysikaaliset vaikutukset, joita ovat

- hermo- ja lihassolujen sähköinen ärsytys eli stimulaatio
- heikkojen valon välähdysten aistimus näkökentän reunoilla eli magnetofosfeenit
- pintasähkövarauksen aistimus.

Stimulaatiota ja magnetofosfeeneja aiheuttavia, hyvin voimakkaita sähkökenttiä, on vain hyvin harvoissa työympäristöissä. Voimajohtojen alla voi kuitenkin olla niin voimakkaita sähkökenttiä, että niiden aiheuttama pintasähkövaraus voidaan aistia ihokarvojen värinä. Aistimuskynnys riippuu henkilön herkkyydestä. Tehtyjen testausten mukaan herkimmillä kymmenesosalla vapaaehtoisista koehenkilöistä kynnyksen on havaittu olevan 2–5 kV/m. Ihokarvojen värinä ei ole terveydelle haitallista mutta voi olla muuten ärsyttävää.

Epäsuoria sähkökentän vaikutuksia ovat kipinäpurkaukset, jotka syntyvät, kun maahan hyvässä kontaktissa oleva henkilö koskee pientaajuksessa sähkökentässä varautuneeseen maasta eristettyyn metallikappaleeseen, esim. auton koriin, tai sähkökentälle altistuva henkilö koskee maadoitettua metallikappaletta. Testien mukaan kipinäpurkauksen on kokenut kivuliaaksi 7 % koehenkilöistä 5 kV/m sähkökentässä ja puolet koehenkilöistä 10 kV/m sähkökentässä.

Pientaajuksen sähkö- ja magneettikentän vaikutukset ilmenevät välittömästi, joten ohjearvot määritellään hetkelliselle kentälle ilman, että määritetään keskiarvo tietyn pituiselle ajan jaksolle. Asetuksen 294/2002 (STMa 2002) mukainen väestön suositusarvo 5 kV/m pitkäaikaiselle altistumiselle sähkökentälle estää siten pintasähkövarauksen aistimuksen ja kivulioiden kipinäpurkauksen tuntemisen suurimmalta osalta ihmisiä. Sitä vastoin lyhytaikaisen altistumisen suositusarvon 15 kV/m suuruudessa sähkökentässä suurin osa ihmisistä kokee kipinäpurkaukset todennäköisesti kivuliaina. Tampereen teknillisen yliopiston tekemien mittausten mukaan sähkökentän voimakkuus 5 kV/m ylittyy Suomessa noin 30 prosentilla pyläsväleillä 400 kV voimajohtojen alla. Suurimmat mitatut sähkökentän voimakkuudet ovat olleet hieman alle 10 kV/m. Kyseisen arvon ylittyminen on hyvin harvinaista, ja lyhytaikaisen altistumisen suositusarvon 15 kV/m ylittäviä sähkökentän voimakkuuksia ei ole 400 kV voimajohtojen alla.

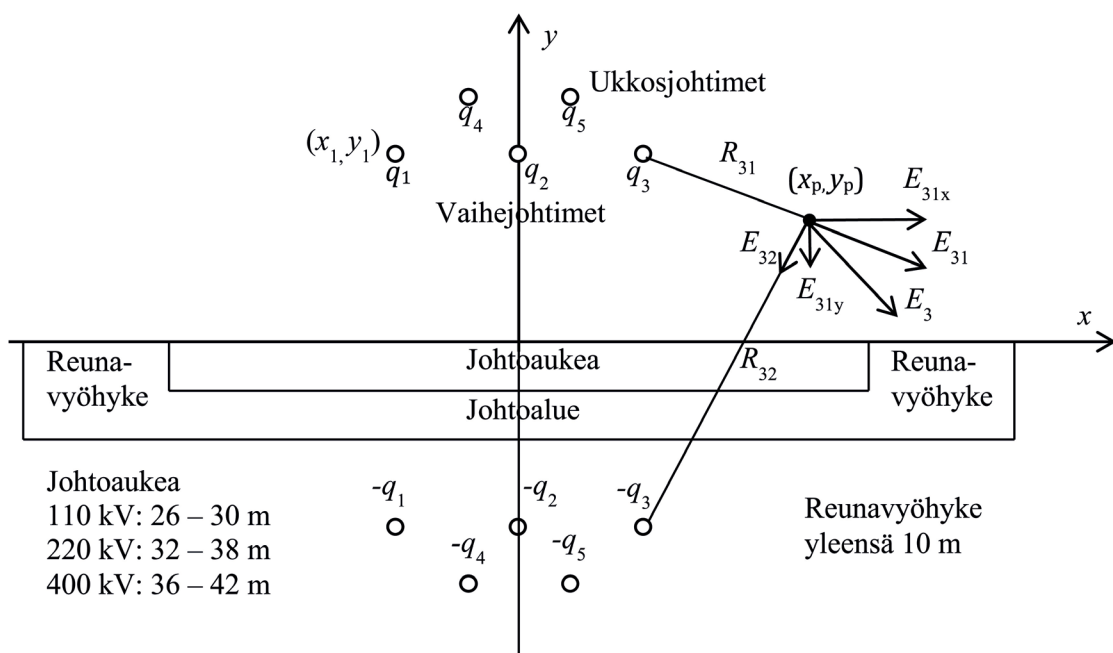
ICNIRPin ohjearvo 5 kV/m sähkökentän voimakkuudelle ei välttämättä suojaa kehonsisäisten lääkinnällisten laitteiden, esimerkiksi sydämentahdistimien, häiriintymiseltä. Siten tällaisia laitteita käyttävien henkilöiden on selvitettävä hoitavalta lääkäriltä, miten menetellään voimajohtojen läheisyydessä.

3 Voimajohtojen sähkökentän voimakkuuden laskenta

Laskennan tarkoituksena on selvittää, miten voimajohdon tekniset ominaisuudet vaikuttavat sen aiheuttamaan sähkökentän voimakkuuteen ja miten suuria sähkökentän voimakkuuksia voi olla voimajohtojen alla ja johtoaukealla sekä reunavyöhykkeellä ilmajohtostandardien mukaisilla alimilla johdinkorkeuksilla (SFS 2016). Sähkökentän voimakkuuteen vaikuttavia ominaisuuksia jännitteen lisäksi ovat mm. vaihejohtimien korkeudet maasta, vaihejohtimien välimatka ja kaksoisjohdoissa vaihejohtimien keskinäinen järjestys. Kuvassa 1 esitetään kaaviomaisesti voimajohdon sähkökentän laskennan periaate ja koordinaatisto sekä voimajohdon johtoaukea, reunavyöhyke ja johtoalue.

Voimajohtojen aiheuttaman sähkökentän voimakkuus voidaan laskea analyyttisesti tai numeerisesti. Laskennassa oletetaan, että maa on tasainen ja täysin johtava ja että johtimet ovat vaakasuorassa maan yläpuolella. Sähkökentän

voimakkuus lasketaan kaksiulotteisesti tasossa, joka on kohtisuorassa voimajohtoja vastaan. Voimajohtojen laskentaan on kehitetty myös numeerisia menetelmiä, joissa huomioidaan maaston muotojen, johtimien riippuman ja pylvään sekä jopa kasvillisuuden vaikutukset. Numeerisilla menetelmillä saadaan kolmiulotteinen sähkökentän voimakkuuden jakauma. Analyyttisten ja numeeristen laskentamenetelmien tuloksia vertaamalla on todettu, että analyyttinen menetelmä antaa samanlaisia tuloksia kuin numeerinen menetelmä jännevälän keskellä tasaisessa maastossa (Salari ym. 2009). Altistumisen kannalta on tärkeintä määrittää sähkökentän voimakkuus siellä, missä se on suurimmillaan eli jännevälän keskellä, jossa johtimet ovat lähimpänä maata. Siten analyyttinen laskentamenetelmä (IEC 2009) on riittävän tarkka, kun määritetään suurinta altistumista voimajohtojen aiheuttamalle sähkökentälle.



Kuva 1. Voimajohdon johtimien varaustiheydet ja niiden peilikuvat sekä sähkökentän voimakkuuden laskennassa käytettävä koordinaatisto.

3.1 Laskentakaavat

Voimajohtojen kukin vaihejohdin voidaan olettaa suoraksi viivalähteeksi, joka aiheuttaa etäisyydellä r sijaitsevaan pisteeseen sähkökentän

$$\vec{E} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} \vec{r}_0, \quad (1)$$

missä q johtimen varaus pituusyksikköä kohti (varaustiheys) ja ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys ($8,8542 \times 10^{-12}$ F/m). Sähkökenttävektorin suunnan määrää yksikkövektori \vec{r}_0 , joka on viivalähteestä pisteeseen suuntautuvan suoran suuntainen. Voimajohdon aiheuttamaa sähkökentän voimakkuutta laskettaessa maa huomioidaan peilikuvaperiaatteella, jolloin lasketaan myös johtimien peilikuvien aiheuttamat sähkökentät.

Kuvassa 1 on esitetty voimajohtojen johtimien ja niiden peilikuvien paikat sekä laskennassa käytettävä koordinaatisto. Vaihejohtimien varaustiheyksien summa oletetaan nolaksi, $q_1 + q_2 + q_3 = 0$ ja ukkosjohtimien varaustiheydet q_4 ja q_5 oletetaan paljon pienemmiksi kuin vaihejohtimien varaustiheydet. Pisteen (x_p, y_p) etäisyydet R_{1i} vaihejohtimisista lasketaan kaavasta

$$R_{1i} = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2}, \quad (2)$$

missä (x_i, y_i) ovat vaihejohtimen i koordinaatit. Pisteen (x_p, y_p) etäisyydet R_{2i} peilikuvista lasketaan vastaavasti kaavasta

$$R_{2i} = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p + y_i)^2}. \quad (3)$$

Sähkökentän voimakkuuden vaakakomponentti E_{xi} ja pystykomponentti E_{yi} lasketaan kullekin vaihejohtimelle i peilikuvineen kaavoista

$$E_{xi} = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{x_p - x_i}{R_{1i}^2} - \frac{x_p - x_i}{R_{2i}^2} \right) \quad (4)$$

ja

$$E_{yi} = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{y_p - y_i}{R_{1i}^2} - \frac{y_p + y_i}{R_{2i}^2} \right). \quad (5)$$

Sähkökentän voimakkuuden vaakakomponentti saadaan summaamalla kaikkien vaihejohtimien ja niiden peilikuvien aiheuttamat vaakakomponentit $E_x = \sum_{i=1}^n E_{xi}$ ja pystykomponentti vastaavasti $E_y = \sum_{i=1}^n E_{yi}$

Komponentit ovat kompleksilukuja, eli niillä on itseisarvo ja vaihe. Sähkökentän voimakkuus pisteessä (x_p, y_p) on $E = \sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2}$

Johtimien varaus q pituusyksikköä kohti lasketaan potentiaalista johtimien pinnalla. Yksittäisen vaihejohtimen i pinnalla potentiaali V_i lasketaan kaavasta

$$V_i = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2y_i}{a_i}, \quad (6)$$

missä a_i on johtimen säde ja y_i johtimen korkeus maasta. Usean vaihejohtimen tapauksessa huomioidaan vaihejohtimien ja niiden peilikuvien kapasitanssit, jolloin kaava (6) muuttuu matriisimuotoon

$$[V] = [q][P]. \quad (7)$$

Matriisissa $[V]$ ovat vaihejohtimien jännitteet maan suhteen ja matriisissa $[q]$ vaihejohtimien varaustiheydet pituusyksikköä kohti. Matriisin $[P]$ lävistäjäalkiot P_{ii} lasketaan kaavasta

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2y_i}{a_i}, \quad (8)$$

missä a_i on johtimen säde ja y_i johtimen korkeus maasta. Muut alkioit lasketaan kaavasta

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \sqrt{\frac{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}, \quad i \neq j, \quad (9)$$

missä D_{ij} on johtimen i etäisyys johtimen j peilikuvasta ja d_{ij} on johtimien i ja j välinen etäisyys. Varausmatriisi $[q]$ ratkaistaan kertomalla käänteismatriisi $[P]^{-1}$ jännitematriisilla $[V]$

$$[q] = [P]^{-1} [V]. \quad (10)$$

Johtimien i varaustiheydet pituusyksikköä kohti sijoitetaan kaavoihin (4) ja (5) sähkökentän voimakkuuden laskemiseksi. Kun vaihejohdin on nippujohdin, joka koostuu useasta osajohtimesta, voidaan laskea nippujohtimen ekvivalenttinen säde a_e kaavasta (El Dein ym. 2010)

$$a_e = R_b \sqrt[n]{\frac{na_c}{R_b}}, \quad (11)$$

missä R_b on nippujohtimen säde, n on osajohtimien lukumäärä ja a_c on osajohtimen säde. Nippujohtimen säde R_b voidaan laskea osajohtimien keskipisteiden välisestä etäisyydestä s_b

$$R_b = \frac{s_b}{2 \sin(\frac{\pi}{n})}. \quad (12)$$

Voimajohtojen jännitteen tehollisarvo ilmaistaan ns. pääjännitteenä V_m , joka on vaihejohtimien välinen jännite. Kunkin vaihejohtimen (R, S, T) jännitteen tehollisarvo V_i maan suhteen on $V_i = \frac{V_m}{\sqrt{3}}$ (Voipio 1976).

Jännitteillä V_i on normaalitilanteessa 120° ($2\pi/3$ radiaanin) vaihe-ero, joten kompleksilukuina V_i vaihejännitteiden tehollisarvot ovat

$$\underline{V}_i = V_i e^{-j\frac{2\pi}{3}(i-1)}, i = 1, 2, 3. \quad (13)$$

Koska vaihejännitteet ovat tehollisarvoja, ovat myös kaavoista (4) ja (5) lasketut sähkökentän voimakkuuden komponentit tehollisarvoja.

Edellä esitetyt kaavat koodattiin Matlab-ohjelmistoon (versio Matlab 2015a). Se soveltui erinomaisesti voimajohtojen aiheuttamien sähkökentän voimakkuuksien laskentaan kompleksiluku- ja matriisilaskentaominaisuuksiensa ansiosta. Matlab-koodilla laskettujen tulosten oikeellisuus tarkistettiin vertaamalla standardissa IEC 62110 esitettyihin esimerkkilaskelmiin (IEC 2009).

3.2 Laskettuja sähkökentän voimakkuuksia erilaisille voimajohdoille

Seuraavassa esitetään Matlabilla laskettuja sähkökentän voimakkuuksia 400 kV ja 110 kV portaalili- ja kaksoisvoimajohdoille.

3.2.1 400 kV portaalijohto

Portaalijohdossa vaihejohtimet on kiinnitetty rinnakkain vaakaorkeen, joten ne ovat samalla korkeudella maasta. 400 kV voimajohdon vaihejohtimet koostuvat tyypillisesti kolmesta osajohtimesta, joiden keskipisteet sijaitsevat tasavivuisen kolmion kärjissä (3-Finch-nippujohdin). Sivun pituus on 450 mm, ja osajohtimien halkaisija on 32,9 mm. Sijoittamalla nämä kaavoihin (11) ja (12) saadaan nippujohtimen ekvivalenttiseksi säteeksi 149 mm. Viereisten vaihejohtimien keskipisteiden välimatka eli vaiheväli on 9 m. Kuvassa 2 esitetään eri vaihejohtimien korkeuksilla lasketut sähkökentän voimakkuudet 2 m korkeudella maasta etäisyyden funktiona 400 kV portaalijohdon keskilinjasta. Kuva 3 esittää käyrinä, miten sähkökentän voimakkuus muuttuu korkeuden mukaan voimajohdon alla keskilinjalla ja sähkökentän maksimikohdassa sekä johtoaukean reunalla 19 m etäisyydellä keskilinjasta, kun vaihejohtimet ovat 8 m korkeudella maasta.

Kuvasta 2 havaitaan, että sähkökentän voimakkuus on suurimmillaan hieman reunimmaisten johtimien ulkopuolella. Sähkökentän voimakkuus ylittää 10 kV/m, kun johtimien korkeus maasta on 8 m, mutta alittaa 10 kV/m, kun johtimien korkeus maasta on enemmän kuin 9 m. Johtimien alin korkeus maasta voi olla 7,9 m (SFS 2016, taulukot 5.10 ja 5.4/FI.1), jolloin sähkökentän voimakkuus ylittää 2 m korkeudella maasta 10 kV/m. Väestön suositusarvo 5 kV/m pitkäaikaiselle altistumiselle sähkökentälle ylittyy, kun johtimien korkeus maasta on 12 m, mutta ei enää, kun johtimien korkeus maasta on 13 m. Suositusarvo 5 kV/m ylittyy 2 m korkeudella maasta noin 17 m etäisyydelle asti johdon keskilinjasta, kun johtimien korkeus maasta on alle 10 m. Tätä etäisyyttä voi verrata johtoaukean leveyteen, joka on 400 kV voimajohdoilla yleensä 36–42 m eli 18–21 m keskilinjasta. Siten johtoaukean reunassa sähkökentän voimakkuus ei ylitä väestön suositusarvoa 5 kV/m ainaakaan alle 2 m korkeudella maasta.

Voimajohdon alla sähkökentän voimakkuus kasvaa nopeasti yli 2 m korkeuksilla maasta, kuten kuvasta 3 voidaan havaita. Sähkökentän voimakkuus ylittää väestön suositusarvon 15 kV/m lyhytaikaiselle altistumiselle noin 4 m korkeudella, kun vaihejohtimien korkeus maasta on 8 m. Kuvasta 3 nähdään, että johtoaukean reunalla 18 m etäisyydellä keskilinjasta sähkökentän voimakkuus on maan pinnalla noin 4 kV/m. Se pysyy lähes samana 5 m korkeuteen asti ja pienenee hitaasti korkeuden edelleen kasvaessa. Johdinkorkeuden kasvaessa sähkökentän voimakkuus pienenee johtoaukean reunalla maan pinnalla. Se kasvaa johdinkorkeuden kasvaessa korkeuden funktiona maan pinnasta, mutta on alle 4 kV/m kaikilla korkeuksilla johtoaukean reunalla. Siten väestön suositusarvo 5 kV/m ei ylity 400 kV portaalijohdon johtoaukean ulkopuolella millään korkeudella maasta eikä millään johdinkorkeudella.

Suuremmalla vaihevälillä (11 m) 400 kV portaalijohdon sähkökentän voimakkuus on hieman suurempi kuin tyypillisellä 9 m vaihevälillä samoilla johdinkorkeuksilla. Sähkökentän voimakkuuden maksimi on kuitenkin 2 m korkeudella maasta alle 10 kV/m, kun johtimien korkeus maasta on vähintään 9 m. Suuremmalla vaihevälillä väestön suositusarvo 5 kV/m ei ylity 2 m korkeudella maasta, kun etäisyys johdon keskilinjasta on enemmän kuin 19 m. Suositusarvo 5 kV/m ylittyy

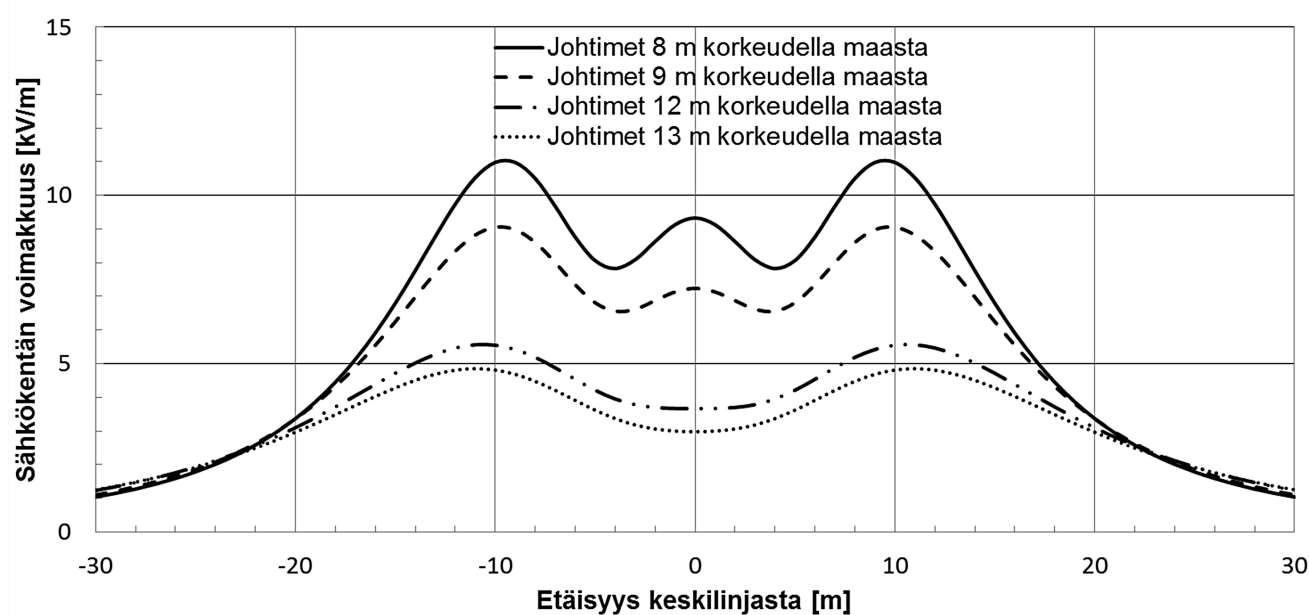
2 m korkeudella maasta noin 19,5 m etäisyydelle asti johdon keskilinjasta, kun johtimien korkeus maasta on alle 8 m. Suuremmalla vaihevälillä johtoaukean leveyskin on vastaavasti suurempi. Vaihevälin ollessa 11 m ja johtoaukean leveyden 40 m väestön suositusarvo 5 kV/m ei ylitä johtoaukean ulkopuolella millään korkeudella maasta eikä millään johdinkorkeudella.

3.2.2 400 kV kaksoisjohto

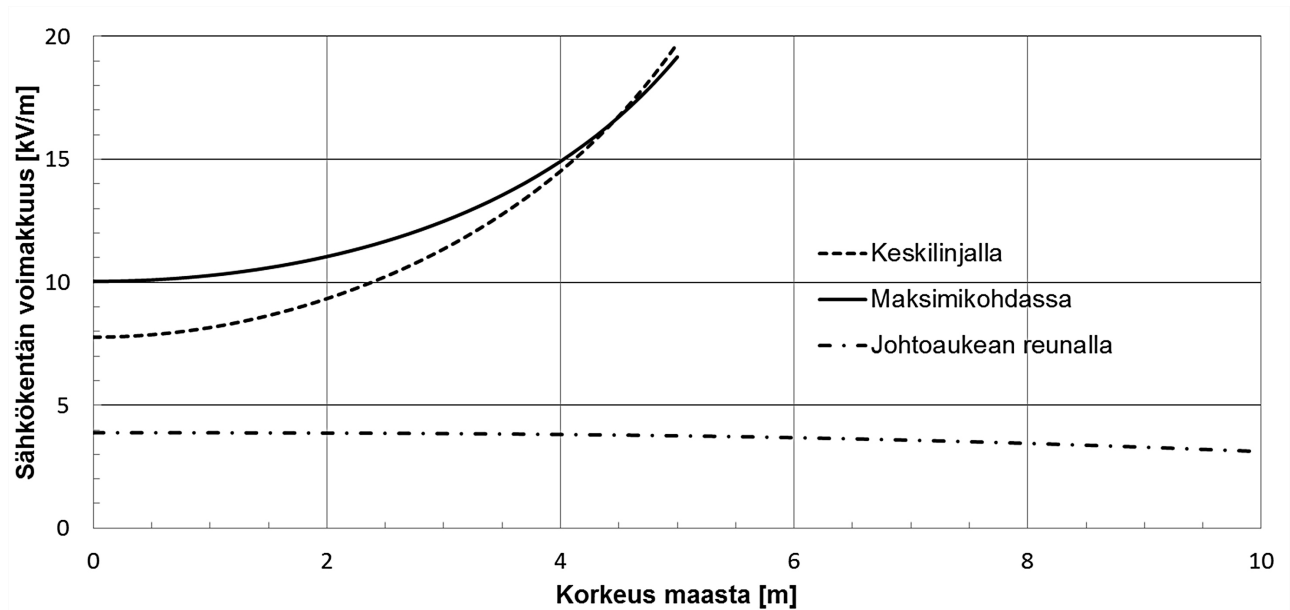
Portaalipylväiden sijasta käytetään myös korkeampia Tannenbaum-tyyppisiä pylväitä, joissa vaihejohtimet ovat eri korkeuksilla maasta. Kuva 4 esittää tyypillisiä 400 kV kaksoisjohtopylväitä. Kuvassa 4a vaihejohtimet ovat peilisymmetrisesti eli samalla korkeudella olevat johtimet ovat samassa vaiheessa, kun taas kuvassa 4b ne ovat pistesymmetrisesti eli alimmat ja ylimmät johtimet ovat keskenään eri vaiheissa. Kuvista ilmenevät vaihejohtimien väliset etäisyydet pysty- ja vaakasuunnassa.

Kaksoisjohtojen sähkökentän voimakkuudet laskettiin 2 m korkeudella maasta ja etäisyyden funktiona johdon keskilinjasta. Vaihejohtimet oli-

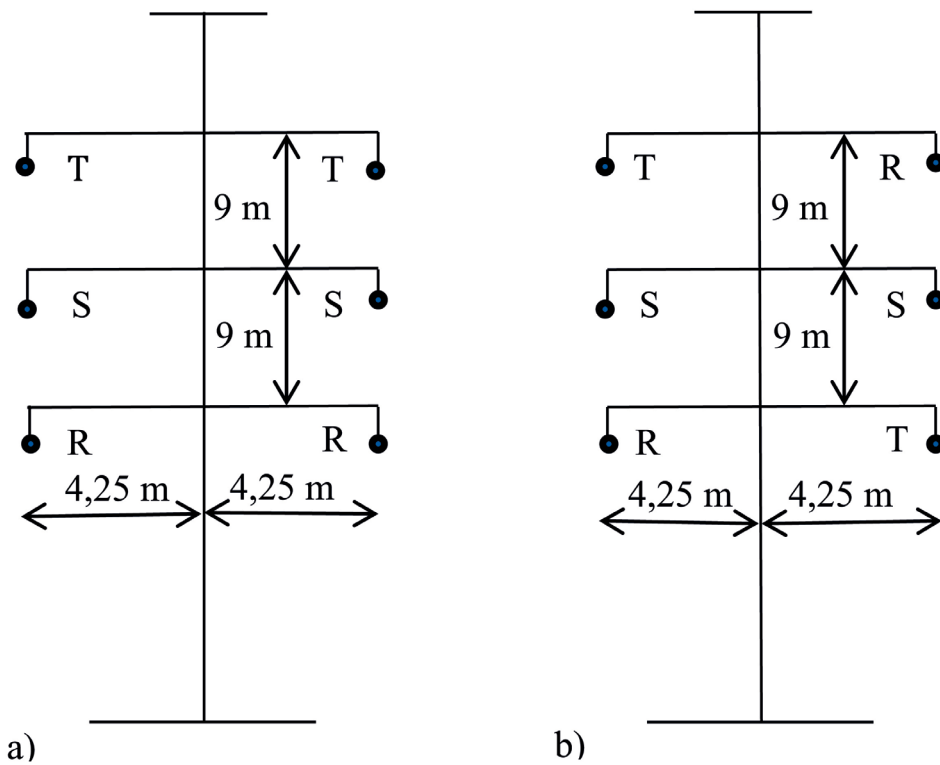
vat 3-Finch-nippujohtimia. Laskentatulokset esitetään käyrinä kuvassa 5 peilisymmetriselle kaksoisjohdolle ja kuvassa 6 pistesymmetriselle kaksoisjohdolle. Kuvista havaitaan, että kaksoisjohdon vaiheistus vaikuttaa merkittävästi sähkökentän voimakkuuteen. Alimpien johtimien ollessa 8 m korkeudella maasta suurin sähkökentän voimakkuus 2 m korkeudella maasta on noin 13,5 kV/m peilisymmetrisellä ja noin 9 kV/m pistesymmetrisellä kaksoisjohdolla. Väestön suositusarvo 5 kV/m ylittyy peilisymmetrisellä kaksoisjohdolla, kun alimpien johtimien korkeus maasta on enintään 18 m, ja pistesymmetrisellä kaksoisjohdolla, kun vastaava korkeus on enintään 11 m. Sähkökentän voimakkuus pienenee etäisyyden kasvaessa kaksoisjohdolla nopeammin kuin portaalijohdolla. Johtoaukean reunalla (18–21 m) kaksoisjohdon sähkökentän voimakkuus on 2 m korkeudella maasta alle 2 kV/m, kun se portaalijohdolla voi olla lähellä 5 kV/m. Johtoaukean reunalla sähkökentän voimakkuus kasvaa korkeuden kasvaessa, mutta on suurimmillaankin alle 3 kV/m. Joten 400 kV kaksoisjohdollakaan sähkökentän voimakkuus ei ylitä 5 kV/m johtoaukean reunalla.



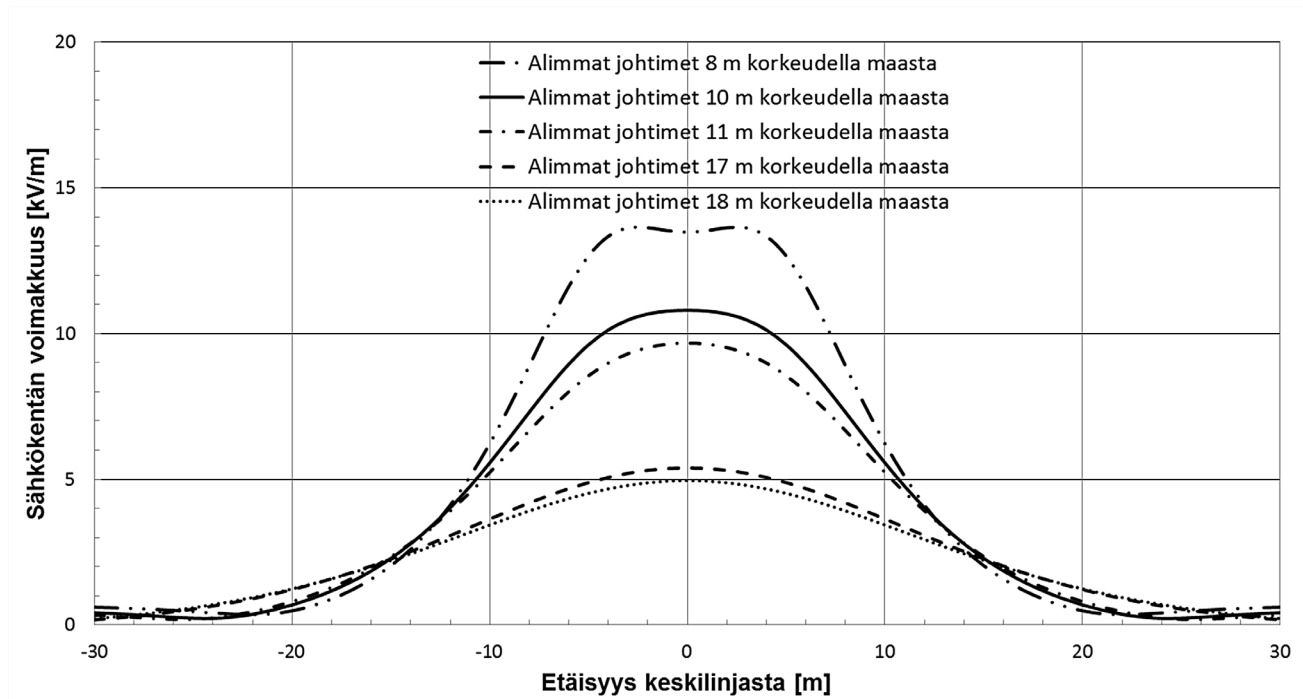
Kuva 2. Eri vaihejohtimien korkeuksilla lasketut sähkökentän voimakkuudet 2 m korkeudella maasta etäisyyden funktiona 400 kV portaalijohdon keskilinjasta.



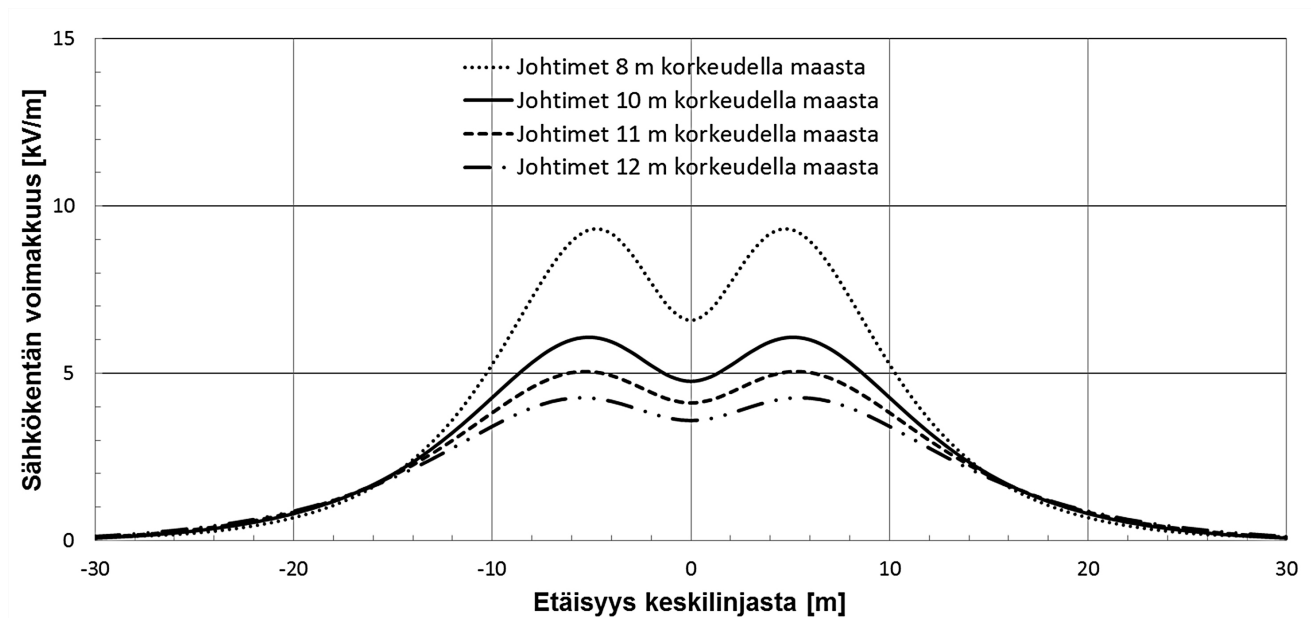
Kuva 3. Lasketut sähkökentän voimakkuudet 400 kV portaaliyhdön keskilinjalla, sähkökentän maksimikohdassa ja johtoaukean reunalla korkeuden funktiona maasta, kun vaihejohtimet ovat 8 m korkeudella maasta.



Kuva 4. 400 kV kaksoisjohtopylvään vaihejohtimien väliset etäisyydet, a) vaihejohtimet peilisymmetrisesti ja b) vaihejohtimet pistesymmetrisesti.



Kuva 5. Lasketut sähkökentän voimakkuudet 2 m korkeudella maasta etäisyyden funktiona 400 kV kaksoisjohdon keskilinjasta, kun vaihejohtimet ovat peilisymmetrisesti (kuva 4a).



Kuva 6. Lasketut sähkökentän voimakkuudet 2 m korkeudella maasta etäisyyden funktiona 400 kV kaksoisjohdon keskilinjasta, kun vaihejohtimet ovat pistesymmetrisesti (kuva 4b).

3.2.3 110 kV portaali johto

110 kV voimajohdon johtimet voivat olla yksittäisiä johtimia tai nippujohtimia, jotka koostuvat kahdesta osajohtimesta (2-Duck-nippujohdin). Osajohtimien keskipisteiden välinen etäisyys on 300 mm ja osajohtimien halkaisija on 24,1 mm. Kaavoista (11) ja (12) saadaan 2-Duck-nippujohtimen ekvivalenttiseksi säteeksi 60 mm. Viereisten johtimien välimatka on tyypillisesti 4,5 m. Eri johtimien korkeuksilla lasketut sähkökentän voimakkuudet 2 m korkeudella maasta esitetään etäisyyden funktiona 110 kV portaali johdon keskilinjasta kuvassa 7.

Kuvasta 7 havaitaan, että vielä 6 m johdin korkeudella sähkökentän voimakkuuden maksimi on selvästi alle väestön suositusarvon 5 kV/m. Suositusarvo ylittyisi, jos johtimien korkeus maasta olisi alle 5 m. Alin korkeus maasta on 110 kV voimajohdon vaihejohtimilla 5,9 m (SFS 2016, taulukot 5.10 ja 5.4/FI.1), joten väestön suositusarvo 5 kV/m ei ylitä 110 kV portaali johtojen alla. Pienemmällä 3,5 m vaihevälillä sähkökentän voimakkuus on pienempi samoilla johdinkorkeuksilla.

3.2.4 110 kV kaksoisjohto

Peilisymmetrisen kaksoisjohdon rakenne on kuvan 4a mukainen. Johtimien etäisyys keskilinjasta on 3 m, ja vaiheväli on pystysuunnassa 3,75 m. Vaihejohtimet ovat 2-Duck-nippujohtimia. Kuvassa 8 esitetään 2 m korkeudella maasta lasketut sähkökentän voimakkuudet eri johdinkorkeuksilla. Kuvasta havaitaan, että 6 m johdin korkeudella sähkökentän voimakkuus on noin 4 kV/m. Alimmalla 110 kV vaihejohtimien korkeudella 5,9 m sähkökentän voimakkuus on alle väestön suositusarvon 5 kV/m voimajohdon alla 2 m korkeudella maasta. Pistesymmetrisellä 110 kV kaksoisjohdolla sähkökentän voimakkuudet ovat samoilla johdinkorkeuksilla pienemmät kuin peilisymmetrisen johdon.

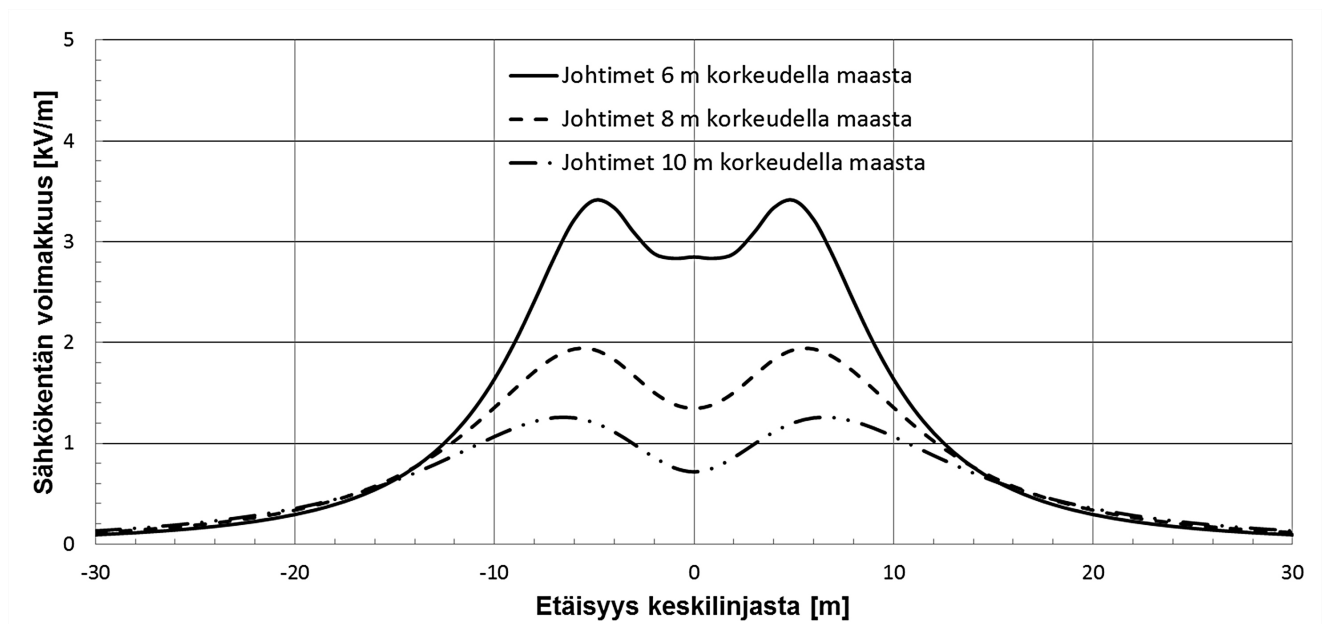
3.3 Laskentatulosten tarkastelua

Laskentatulosten mukaan sähkökentän voimakkuuteen vaikuttavat jännitteen lisäksi, johtimien korkeus maasta, vaihejohtimien välimatka ja kak-

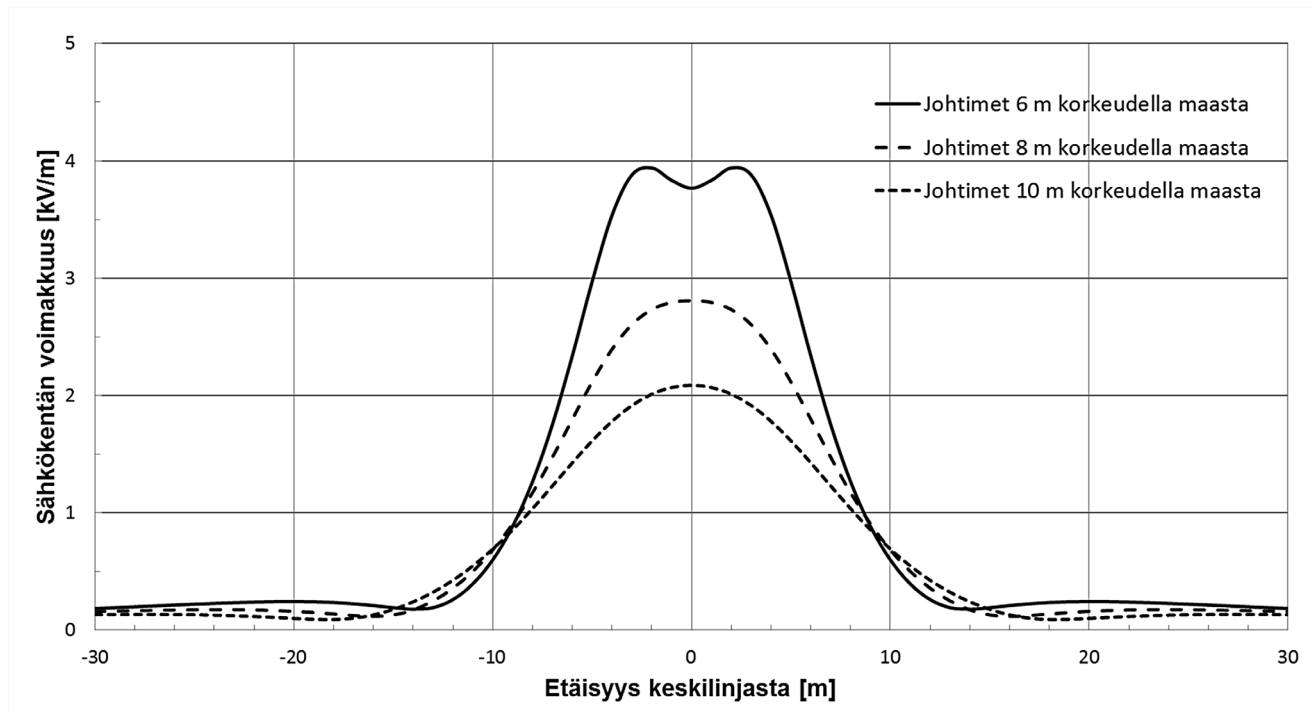
soisjohtojen vaihejohtimien järjestys. Suurimmat sähkökentän voimakkuudet ovat 400 kV voimajohtojen alla, jossa väestön suositusarvo 5 kV/m pitkäaikaiselle altistumiselle ylittyy alle 2 m korkeudella maasta useissa paikoissa jännevälin keskikohdalla, jossa johtimet ovat lähimpänä maata. Myös työntekijöiden toimenpidetaso 10 kV/m voi teoriassa ylittyä alimmilla sallituilla johdinkorkeuksilla portaali johdoilla tai kaksoisjohdoilla, joissa on peilisymmetrisen vaihejärjestys (ks. kuva 4a). Johtoauekan ulkopuolella väestön suositusarvo 5 kV/m ei kuitenkaan ylitä millään korkeudella maasta.

Väestön suositusarvo 5 kV/m ei ylitä 110 kV voimajohdon alla alle 2 m korkeudella maasta. Suurimmat sähkökentän voimakkuudet voivat olla noin 4 kV/m alimmilla sallituilla johdinkorkeuksilla peilisymmetrisellä kaksoisjohdolla. Tyypillisesti sähkökentän voimakkuus on 1–2 kV/m 110 kV voimajohdon alla. Sitä vastoin 220 kV voimajohdon alla sähkökentän voimakkuus on suurempi ja voi alimmilla ilmajohtostandardien sallimilla johdinkorkeuksilla sekä pienimmillä vaiheväleillä olla lähellä 5 kV/m.

Laskentamenetelmällä saadaan tarkkoja tuloksia, kun maasto on tasaista ja kasvillisuus on hyvin matalaa, esimerkiksi orastava tasainen pelto. Kumpuileva maasto ja kasvillisuus muuttavat sähkökentän voimakkuutta ja sen jakautumaa. Sähkönsiirron taajuudella 50 Hz maa on hyvin johtavaa, joten laskennan oletus täysin johtavasta maasta ei aiheuta merkittävää virhettä. Nippujohtimen ekvivalenttisen säteen määrittämisen epätarkkuuskaan ei aiheuta merkittävää virhettä. Kymmenen prosentin muutos johtimen säteessä aiheuttaa vain noin kahden prosentin muutoksen sähkökentän voimakkuuteen. Laskennalla saadaan siten hyvä yleiskuva siitä, miten eri tekijät vaikuttavat sähkökentän voimakkuuteen. Laskentatulosten perusteella voidaan valita mitauspaikat, joissa on odotettavissa suurimmat sähkökentän voimakkuudet. Laskentatulokset on kuitenkin aina varmistettava luotettavilla mitauksilla.



Kuva 7. Eri vaihejohtimien korkeuksilla lasketut sähkökentän voimakkuudet 2 m korkeudella maasta etäisyyden funktiona 110 kV portaali johdon keskilinjasta.



Kuva 8. Eri vaihejohtimien korkeuksilla lasketut sähkökentän voimakkuudet 2 m korkeudella maasta etäisyyden funktiona 110 kV peilisymmetrisen kaksoisjohdon keskilinjasta.

4 Voimajohtojen sähkökentän voimakkuuden mittaukset

4.1 Mittausmenetelmä

Voimajohtojen sähkökentän voimakkuus mitattiin STUKin pientaajuisten sähkö- ja magneettikentän mittarilla Wavecontrol SMP2, johon oli kytketty isotrooppinen sähkö- ja magneettikentän mittapää WP 15 (ks. kuva 9a). Valmistaja oli kalibroinut mittarin ja mittapään vuonna 2015. Vertailumittarina käytettiin Työterveyslaitoksen pientaajuisten sähkö- ja magneettikentän mittaria Narda EFA-300. Se koostui isotrooppisesta kuutiomaisesta mittapäästä (ks. kuva 9b), josta mittaussignaali siirrettiin sähkökenttää häiritsemättömällä valokaapelilla näyttöosaan, jota luettiin muutaman metrin etäisyydellä mittapäästä.

Mittausten tarkoituksena oli selvittää, millaisella asettelulla Wavecontrol SMP2 -mittarilla saadaan mahdollisimman luotettavia ja toistettavia mittaustuloksia. Sähkökentän voimakkuus tulisi mitata mahdollisimman häiriintymättömässä kentässä. Mittapään lähellä olevat kappaleet, kuten mittarikotelo, kolmijalka ja mittapään kiinnitysauva, voivat muuttaa mittapäähän kohdistuvaa sähkökenttää. Mittauksissa tutkittiin, miten mittarin asento ja sen asettelu puiseen kolmijalkaan vaikuttavat mittaustulokseen. Vertailumittarina käytettiin Narda EFA-300 -mittaria, jonka kuutiomaisella mittapäällä saatiin lähes samanlaisia mittaustuloksia mittapään eri asennoissa.

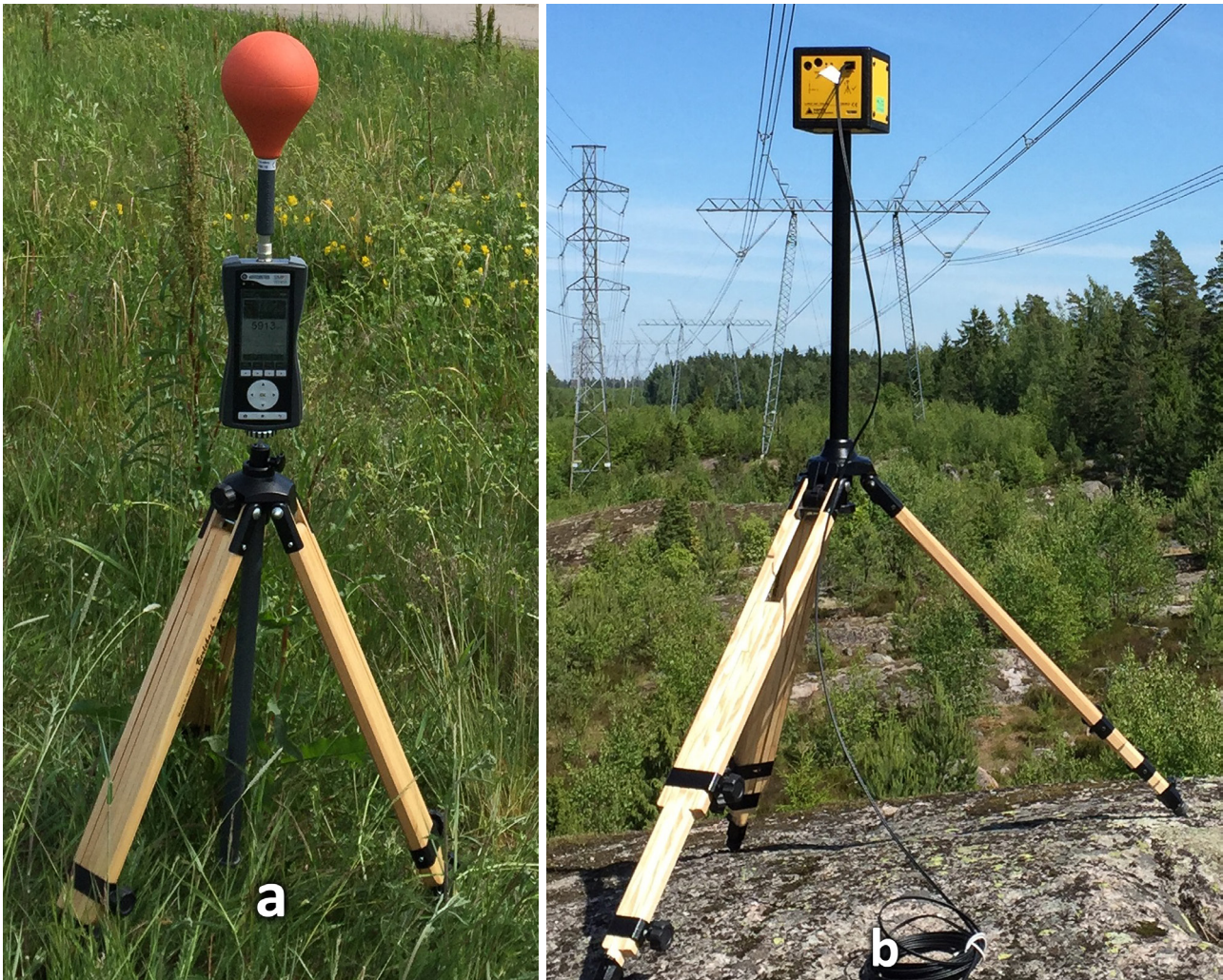
Standardissa IEC 61786-1 (IEC 2013) ohjeistetaan sähkökentän mittapään asettelu mittaustilanteessa. Mittapää on asetettava noin 1 m pituisen vaakasuoran eristesauvan päähän, ja eristesauva on kiinnitettävä puiseen kolmijalkaan. Jos mittaaja pitää eristesauvaa käsissään, sauvan

pitouden on oltava noin 2 m, joka on standardissa IEC 61786-2:2014 mainittu minimietäisyys (IEC 2014).

Standardin IEC 62110 (IEC 2009) mukaisesti voimajohdon sähkökentän voimakkuuden maksimi on etsittävä jänneväliä mittaamalla 1 m korkeudella maasta sopivilta välimatkoilta johtimien alta johdon pitkittäissuunnassa. Jännevälin maksimikohdassa etsitään mittaamalla sähkökentän voimakkuuden maksimi poikittaissuunnassa. Mittauspaikan tulisi standardin IEC 62110 mukaan olla tasainen, eikä sen lähellä (noin 3 m etäisyydelle asti) tulisi olla esineitä, rakennuksia, kasvillisuutta tms.

Tässä raportissa esitetyt mittaukset tehtiin voimajohdon alla sähkökentän maksimikohdassa, joka oli etsitty kulkemalla voimajohdon alla ja pitämällä mittaria kädessä. Maksimikohdassa mittari tai mittapää asetettiin puiseen kolmijalkaan 1 m korkeudelle maasta. Mittarit luettiin noin 4 m etäisyydeltä, jolloin mittarin lukija ei enää häirinyt mittapäähän kohdistuvaa sähkökenttää. Kuva 9a esittää Wavecontrol SMP2 -mittaria ja kuva 9b Narda EFA-300 -mittarin mittapäätä puiseen kolmijalkaan kiinnitettynä.

Vaihejohtimien korkeutta maasta yritettiin mitata laseretäisyysmittarilla. Sillä ei saatu luotettavia mittaustuloksia. Nippujohtimien osajohtimet osoittautuivat liian ohuiksi eikä mittauspisteen yläpuolella olevan osajohtimen korkeudesta saatu mittariin lukemaa. Lukema saatiin vain osajohtimia yhdistävästä johtimista paksummasta nippusteestä, joka ei kuitenkaan sijainnut mittauspisteen yläpuolella.



Kuva 9. a) Pientaajuisen sähkö- ja magneettikentän mittari Wavecontrol SMP2 ja mittapää WP 15 ja b) Narda EFA-300 -mittarin sähkökentän mittapää puiseen kolmijalkaan kiinnitettynä voimajohdon sähkökentän mittausta varten. (Kuva: Lauri Puranen, STUK)

4.2 Mittaustulokset

Sähkökentän voimakkuus mitattiin kahdessa mittauspaiassa 400 kV voimajohdon alla. Voimajohdoissa oli portaaliypylvää, eli vaihejohtimet olivat samalla korkeudella maasta. Mittauspaikat valittiin siksi, että niiden lähelle pääsi autolla ja että niissä johtimet olivat silmämääräisesti arvioituna suhteellisen matalalla, runsaan 10 m korkeudella maasta.

4.2.1 Mittauspaikka 1

Mittauspaikka 1 esitetään kuvassa 10. Se oli ruohikkokummulla kahden viereisen 400 kV portaali-voimajohdon alla. Ruohikon korkeus oli 20–30 cm.

Alustavalla mittauksella selvitettiin, että sähkökentän maksimit olivat reunimmaisten johtimien alla noin 24 m etäisyydellä voimajohtojen välisen alueen keskikohdalta. Sähkökentän voimakkuuden jakauma voimajohtojen poikittaissuunnassa vastasi laskettua jakaumaa, jota esittää kuva 11. Siinä laskettu sähkökentän voimakkuus esitetään 1 m korkeudella maasta etäisyyden funktiona portaalijohtojen puolivälistä, kun vaihejohtimien välimatka on 9 m. Maksimipisteissä laskettu sähkökentän voimakkuus oli siten 4,4 kV/m, kun vaihejohtimien korkeus maasta oli 14 m.

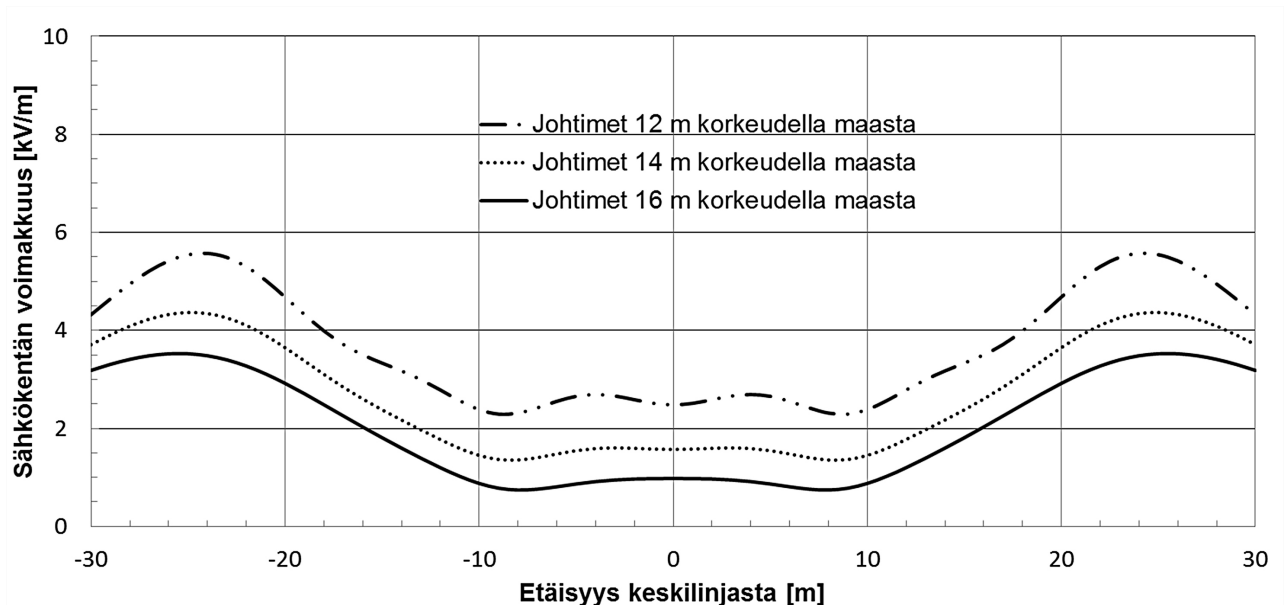


Kuva 10. Mittauspaikka 1 kahden viereisen 400 kV portaaliveimajohdon alla. (Kuva: Lauri Puranen, STUK)

Mittauksen alkaessa ilman lämpötilaksi mitattiin $24,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ auringon paisteessa ja ilman suhteelliseksi kosteudeksi $33,5\text{ }\%$. Ilmatieteen laitoksen parin kilometrin päässä sijaitsevassa Helsinki-Vantaan lentoaseman mittauspisteessä lämpötila oli $16,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ varjossa ja ilman suhteellinen kosteus $44\text{ }\%$. Sää oli aurinkoinen ja tuulen nopeus oli $4\text{--}7\text{ m/s}$.

Mittaustulokset esitetään taulukossa 1. Siitä havaitaan, että Wavecontrol SMP2 -mittarin mittapään varren asento vaikuttaa merkittävästi mitaustulokseen. Pystyasennossa sähkökentän suuntaisena mittarin lukema on $30\text{--}40\text{ }\%$ suurempi kuin vaaka-asennossa kohtisuorassa sähkökent-

tään nähden. Vertailumittarin mittapään asento ei vaikuttanut mitaustulokseen. Mittapään asettelu kolmijalkaan vaikutti lukemaan. TTL:n ja STUKin kolmijalan pienet rakenteelliset erot vaikuttivat myös mitaustulokseen. Mittareilla saatiin toistettavia mitaustuloksia, kun Wavecontrol SMP2 -mittari ja Narda EFA-300 -mittarin mittapää asetettiin vaakasuoran muovisauvan päähän siten, että mittapää oli noin 1 m etäisyydellä kolmijalasta. Tällä tavalla sähkökentän mittapää ohjeistetaan asetettavaksi kolmijalkaan standardissa IEC 61786-1 (IEC 2013).



Kuva 11. Sähkökentän voimakkuuden laskettu jakauma voimajohtojen poikittaissuunnassa 1 m korkeudella maasta mittauspäikässä 1.

Taulukko 1. Kahden vierekkäisen 400 kV portaali voimajohdon alta ruohikkokummulla 1 m korkeudella maasta mitatut sähkökentän voimakkuudet.

Wavecontrol SMP2 + WP 15		Narda EFA-300	
Lukema kV/m	Mittarin asettelu	Lukema kV/m	Mittapään asettelu
6,0	mittapään varsi pystysuorassa	4,9	TTL:n kolmijalka
4,2	mittapään varsi vaakasuorassa, mittapää 0,5 m etäisyydellä kolmijalasta	4,3	STUKin kolmijalka
5,6	mittapään varsi pystysuorassa	4,8	TTL:n kolmijalka
4,3 4,5	mittapää vaakasuoran muovisauvan päässä 1 m etäisyydellä kolmijalasta	4,3 4,6	mittapää vaakasuoran muovisauvan päässä 1 m etäisyydellä kolmijalasta

4.2.2 Mittauspaikka 2

Mittauspaikka 2 (ks. kuva 9b) oli kalliolla met-sän keskellä 400 kV portaalivoimajohdon alla. Mittauspisteiden vieressä oli 1–2 m korkeita pensaita. Maasto oli epätasaista ja vaikeakulkuista, joten sähkökentän voimakkuuden jakaumaa voimajohdon poikittaissuunnassa ei voitu mitata. Voimajohdon alta valittiin kaksi mittauspistettä avoimelta paikalta siten, että lähimmät pensaat olivat vähintään 3 m etäisyydellä.

Mittausten alussa ilman lämpötilaksi mitattiin 23,5 °C ja suhteelliseksi kosteudeksi 27,5 %. Noin kymmenen kilometrin etäisyydellä sijaitsevan Ilmatieteen laitoksen Helsinki-Vantaan lentotaseaman sääaseman vastaavat mittautiedot olivat 21,8 °C ja 31 %.

Mittauspiste 1 sijaitsi voimajohdon alla 1 m korkeudella kalliosta keskimmaisesta vaihejohtimesta noin 2 m sivulle päin. Wavecontrol SMP2 -mittarin lukema oli 3,1 kV/m pystysuorassa asennossa ja 2,9 kV/m vaakasuorassa asennossa. Narda EFA-300 -mittarin lukema oli samassa pisteessä 3,0 kV/m.

Mittauspiste 2 sijaitsi toisella pylväsvälillä reuna-ajohtimesta noin 1 m ulospäin. Kyseisen pisteen yläpuolella vaihejohtimessa oli nippuside, josta laseretäisyysmittarilla vaihejohtimen korkeudeksi kallion pinnasta mitattiin noin 12 m. Kuvassa 2 esitettiin tällaiselle portaalijohdolle eri johdin- korkeuksilla lasketut sähkökentän voimakkuudet etäisyyden funktiona voimajohdon keskilinjasta 2 m korkeudella tasaisen maan pinnasta. Vaihejohtimien ollessa 12 m korkeudella maasta laskettu sähkökentän voimakkuus oli maksimikohdassa 2 m korkeudella 5,6 kV/m ja 1 m korkeudella 5,4 kV/m.

Mittauspisteessä 2 mitattiin Wavecontrol SMP2 -mittarilla sähkökentän voimakkuudeksi 1 m korkeudella kallion pinnasta 6,7 kV/m, kun mittari oli pystyasennossa ja 5,5 kV/m, kun mittari oli vaaka-asennossa ja mittapää noin puolen metrin etäisyydellä kolmijalasta. Narda EFA-300 -mittarin lukema oli 1 m korkeudella 6,0 kV/m. Kolmijalan läheisyys näytti suurentavan mittarin lukemaa, kun mittari oli kiinnitetty kolmijalan keskiön pystysauvaan. EFA-300 -mittarin lukema kasvoi lukemaan 9,6 kV/m, kun pystysauva laskettiin alimpaan asentoon, jossa mittapää kosketi kolmijalan keskiötä. Kolmijalka näytti puolestaan pienentävän vaaka-asentoisen Wavecontrol SMP2

-mittarin lukemaa, jos mittapää oli puolen metrin etäisyydellä kolmijalasta. Mittapään vieressä seisova henkilö pienensi mittarin lukemaa. Mittarin pitäminen kädessä pään yläpuolella suurensi lukeman aina 22 kV/m asti.

4.2.3 Kasvillisuuden vaikutus mittaustulokseen

Mittauspaikassa 1 selvitettiin muutamalla mittaustuloksella, miten kasvillisuus vaikutti mittaustulokseen. Mittauksilla todettiin, että matala kasvillisuus (ruohikko) sähkökentän mittapään ja maan välissä suurensi mittaustulosta, kun taas läheinen kasvillisuus mittapään vieressä pienensi mittaustulosta. Nämä olivat alustavia tuloksia ja vaatisivat lisämittauksia havaitun vaikutuksen varmistamiseksi.

4.3 Tampereen teknillisen yliopiston tekemät voimajohtojen sähkökentän mittaukset

Tampereen teknillinen yliopisto (TTY) (aikaisemmin Tampereen teknillinen korkeakoulu) on mitannut professori Leena Korpisen johdolla voimajohtojen sähkö- ja magneettikentän voimakkuuksia 1990-luvun lopulta lähtien Tampereen ja Helsingin seudulta. TTY:lle on siten kertynyt paljon mittaustuloksia. Joissakin mittauspisteissä mittaustuloksia on myös verrattu laskentatuloksiin.

TTY mittasi sähkökentän voimakkuutta 1 m korkeudella maasta 38 mittauspisteestä käyttämällä Wandel & Goltermannin EFA-3 -mittaria, joka oli ominaisuuksiltaan samanlainen kuin kuvassa 9b esitetty Narda EFA-3 -mittari (Keikko ym. 2000). Sähkökentän voimakkuus ylitti 10 mittauspisteessä 5 kV/m. Suurin mitattu arvo oli 9,32 kV/m. Mitattujen ja laskettujen kentänvoimakkuuksien välillä oli merkittäviä eroja, joiden arvioitiin johtuvan vaihtelevasta kuormituksesta, epätasaisesta maastosta ja laskentaparametrien epätarkkuudesta. Kasvillisuuden todettiin vaiementavan sähkökenttää, mutta se ei selitä tapauksia, joissa mitattu arvo oli paljon suurempi kuin laskettu arvo. Voimajohtojen jännitekään ei vaihtele kuormituksen mukaan muutamaa prosenttia enempää, joten mittaus- ja laskentatulosten erojen todennäköisin syy liittyy epätasaiseen maastoon ja laskentaparametrien epätarkkuuteen.

Halinen ym. (2001) tutkivat kasvillisuuden vaikutusta sähkökentän voimakkuuden mitta-

tuloksiin. Matala kasvillisuus, esimerkiksi vilja, 1 m korkeudella maasta sijaitsevan mittauspisteen alapuolella näytti suurentavan mittaustulosta sitä enemmän, mitä korkeampaa se oli. Tosin mittapäästä lähes koskettavan kasvillisuuden arveltiin jo mittausvirheen vuoksi lisäävän mittaustulosta. Mittapään vieressä sijaitseva kasvillisuus sitä vastoin pienensi mittaustulosta sitä enemmän, mitä korkeampi kasvi oli kyseessä. Metsän havaittiin vaimentavan sähkökenttää noin 70 % 1–5 m etäisyydelle metsän reunasta, kun puuston korkeus oli noin 20 m. Mittausten mukaan parhaimmillaan jo 5–10 m korkeat puut vaimensivat sähkökenttää 1–5 m etäisyydelle puista. Nämä mittaukset antoivat siten samansuuntaisia tuloksia kuin kohdassa 4.2.3 esitetyt muutamat STUKin mittaukset. Näiden mittaustulosten mukaan muutaman metrin korkuisilla puilla voisi pienentää sähkökentän voimakkuutta johtoalueen reunavyöhykkeellä johtoaukean ulkopuolella.

4.4 Sähkökentän voimakkuuden mittauksen epävarmuus

Sähkökentän voimakkuuden mittauksen epävarmuuteen vaikuttavat voimajohtojen tekniset ominaisuudet, sähkökentän epätasaisuus, mittauslaitteen ominaisuudet ja kalibrointi, mittausolosuhteet, mittausmenetelmä, ja mittauspisteen lähiympäristö. Jopa mittarin ja mittapään rakennekin vaikuttavat mittaustulokseen.

Sähkökentän voimakkuus riippuu voimajohtojen jännitteestä, joka vaihtelee hyvin vähän. Maksimin ja minimin ero 400 kV voimajohdon jännitteessä on ollut vain 2 % (Korpinen ym. 2013). Jännitteen vaihtelu ei siten vaikuta merkittävästi mittauksen epävarmuuteen. Voimajohdon aiheuttama sähkökentän voimakkuus muuttuu vaakatai pystysuunnassa muutaman senttimetrin matkalla vain prosentin kymmenysosia, joten mittapään asettelun epävarmuus ei lisää merkittävästi mittauksen epävarmuutta.

Mittauksen epävarmuuteen vaikuttavat mittauslaitteen taajuusvasteen tasaisuus, epäisotrooppisuus ja -lineaarisuus sekä kalibroinnin epävarmuus. Wavecontrol SMP2 -mittarin sähkökentän mittapään kalibroinnin epävarmuudeksi valmistaja on ilmoittanut 95 % luottamustasolla $\pm 2,6$ % taajuusalueella 10 Hz–10 kHz. Sähkökentän mittauksen epävarmuutta ei ole arvioitu. Narda EFA-300 -mittarin valmistaja on

ilmoittanut sähkökentän voimakkuuden mittauksen epävarmuudeksi ± 3 %, joka sisältää mittauslaitteen taajuusvasteen vaihtelusta, epälineaarisuudesta ja epäisotrooppisuudesta johtuvan epävarmuuden. Epävarmuus pätee 0–50 °C lämpötila-alueella ja alle 95 % suhteellisella kosteudella.

Valmistajien ilmoittamaan suhteellisen kosteuden vaikutukseen voi suhtautua kuitenkin varauksin. Korpinen ym. (2013) tutkivat kyseisen mittarimallin toimintaa sähkökentän voimakkuuksilla 1–25 kV/m säähuoneessa, jonka lämpötilaa muutettiin välillä 15–25 °C ja ilman suhteellista kosteutta välillä 55–95 %. Lämpötilan vaihtelu ei näyttänyt vaikuttavan merkittävästi mittarin toimintaan, mutta suhteellinen kosteus vaikutti. Mittarilla ei saanut luotettavia lukemia, kun kosteus ylitti 70 %. Suurilla kosteuksilla myös mittapään asettelu kolmijalkaan vaikuttaa lukemaan, kuten standardin IEC 61786-1 liitteessä F esitetään (IEC 2013). Kun ilmankosteus oli yli 70 %, mittarin lukema kasvoi jopa 7-kertaiseksi mittapään ollessa kolmijalkaan kiinnitetyn pystysuoran sauvan päässä. Lukema kasvoi vain noin 40 %, kun mittapää oli kolmijalkaan kiinnitetyn noin 2 m pituisen vaakasuoran sauvan päässä. Suurilla ilmankosteuksilla kosteus tiivistyy eristesauvaan, jonka johtavuuden kasvun myötä se häiritsee enemmän sähkökenttää. Sähkökentän voimakkuutta ei siten voi luotettavasti mitata, kun ilman suhteellinen kosteus on enemmän kuin 70 %.

Mittapään lähiympäristö vaikuttaa mittauksen epävarmuuteen eniten. Mittapään lähellä sijaitsevat kappaleet ja esineet, varsinkin sähköä johtavat, häiritsevät sähkökenttää. Mittarin ja mittapään rakennekin vaikuttavat mittaustulokseen. Wavecontrol SMP2 -mittari näyttää 30–40 % enemmän mittapään varren ollessa sähkökentän suuntainen kuin sen ollessa kohtisuorassa sähkökenttään nähden. Myös puinen kolmijalka ja sähkökentän suuntainen muovisauva vaikuttavat mittarin lukemaan, jos ne ovat alle metrin etäisyydellä mittapäästä. Mittaajan keho muuttaa mittarin lukemaa alle kolmen metrin etäisyydellä mittapäästä. Pitkä ruohikko tai vilja kasvattaa sähkökentän voimakkuutta ja viereinen kasvillisuus pienentää sähkökentän voimakkuutta sitä enemmän, mitä korkeampaa se on. Lähiympäristön vaikutusten minimoimiseksi mittapään ympärillä pitäisi olla vapaata tilaa joka suuntaan ainakin

kolme metriä. Mittapää on asetettava vaakasuoran muovisauvan päähän runsaan metrin etäisyydelle puisesta kolmijalasta tai noin kolmen metrin pituisen muovisauvan päähän, jos mittaaaja pitää mittaria käsissään. Asianmukaisella mittarin ja mittapään asettelulla mittapään lähiympäristön vaikutus mitattavan sähkökentän voimakkuuteen voidaan arvioida olevan korkeintaan $\pm 10\%$.

Voimajohtojen sähkökentän mittauksen epävarmuuteen vaikuttavat tekijät esitetään taulukossa 2. Mittaus oletetaan tehtäväksi lämpötilan ollessa välillä $10\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja ilman suhteellisen kosteuden ollessa alle 70% . Mittapään lähiympäristön arvioidaan vaikuttavan $\pm 10\%$ mitattavan sähkökentän voimakkuuteen. Mittaaja ja esineet sekä kappaleet ovat vähintään 2 m etäisyydellä mittapäästä. Taulukosta nähdään, että mittapään lähiympäristö vaikuttaa eniten sähkökentän voimakkuuden mittauksen epävarmuuteen. Huolellisella mittaustilanteen valmistelulla sähkökentän voimakkuuden mittauksen arvioitu epävarmuus 95% luottamusvälillä on $\pm 12\%$. Arvioitu yhdistetty epävarmuus on $\pm 6\%$, joka on selvästi vähemmän kuin standardissa IEEE 644TM-1994 suositeltu epävarmuuden enimmäisarvo $\pm 10\%$ (IEEE 1994).

4.5 Mittausten tarkastelua

Sähkökentän voimakkuuden mittaus maasto-olosuhteissa on haastavaa. Maaston epätasaisuuden ja kasvillisuuden vuoksi on hyvin hankalaa mitata sähkökentän voimakkuutta standardin mukaan järjestelmällisesti valituissa mittauspisteissä johtojen suuntaisesti ja jännevälin maksimikohdassa johtoja vastaan kohtisuorassa suunnassa. Käytännössä sähkökentän maksimikohta kannattaa etsiä pitämällä mittapäätä kädessä.

Sähkökentän maksimikohdassa mittapää asetetaan puiseen kolmijalkaan. Mittapää on asetettava kasvillisuudesta vapaaseen kohtaan vaakasuoran muovisauvan päähän ainakin metrin etäisyydelle kolmijalasta. Mittaukseen osallistuvien henkilöiden on oltava vähintään noin kolmen metrin etäisyydellä mittapäästä.

STUK mittasi vain kahdessa mittauspai-
kassa, joissa 400 kV portaali-johtojen vaihejohtimet näyttivät olevan matalalla. Näistä paikoista mitattu suurin sähkökentän voimakkuus oli 6 kV/m . Kummassakaan paikassa johtimien korkeutta ei voitu mitata luotettavasti, joten mittaustuloksia ei voitu verrata laskentatuloksiin. Jatkossa olisi hyvä hankkia mittauslaite vaihejohtimien korkeuden tarkkaan määrittämiseen, mikä mahdollistaisi tämän vertailun. Olisi myös hyödyllistä saada lisää mittausdataa 400 kV voimajohtojen sähkökentän voimakkuuksista. Varsin mielenkiintoisia olisivat 400 kV kaksoisjohdot, joita ei valitettavasti ole pääkaupunkiseudulla.

TTY on tehnyt lukuisia voimajohtojen sähkökentän voimakkuuden mittauksia ja vertailuja vastaaviin laskentatuloksiin. Mittaus- ja laskentatulosten välillä on ollut merkittäviä eroja. Erojen syytä ei ole voitu kunnolla selvittää. Todennäköisin syy on ollut mittaolosuhteiden merkittävä poikkeama laskennan oletusarvoista. TTY:n mittaustulosten perusteella on arvioitu, että väestön suositusarvo 5 kV/m ylittyy noin 30% prosentilla 400 kV voimajohtojen jänneväleistä (Korpinen ym. 2003). Sitä vastoin työntekijöiden toimenpidetason 10 kV/m ylittäviä sähkökentän voimakkuuksia ei ole mitattu voimajohtojen alta. Väestön suositusarvo 5 kV/m ei mittausten mukaan ylittynyt 220 kV eikä 110 kV voimajohtojen alla.

Taulukko 2. Sähkökentän mittauksen epävarmuus.

Epävarmuus-tekijä	Viite	Määritelty epävarmuus %	Todennäköisyys-jakauma	Jakaja	Standardi-epävarmuus %
Jännite	Korpinen ym. 2013	1	Tasainen	$\sqrt{3}$	0,58
Kentän epätasaisuus	Laskentatulokset	0,5	Tasainen	$\sqrt{3}$	0,29
Mittauslaite ja sen kalibrointi	Valmistajan ilmoitus	3	Normaali (k = 2)	2	1,50
Mittapään lähiympäristö	Oma arvio	10	Tasainen	$\sqrt{3}$	5,77
Yhdistetty epävarmuus			Normaali		6,0
Laajennettu epävarmuus (k = 2)			Normaali		12

5 Johtopäätökset

Voimajohtojen aiheuttaman sähkökentän voimakkuuden laskentaan kehitettiin Matlab-ohjelmisto. Sen antamien laskentatulosten oikeellisuus varmistettiin vertaamalla tuloksia kansainvälisissä standardeissa esitettyihin esimerkkitapauksiin. Ohjelmistolla laskettiin sähkökentän voimakkuuksia erilaisten voimajohtojen läheisyydessä. Laskentatulosten mukaan väestön suositusarvo 5 kV/m ylittyy kahden metrin korkeudella maasta useissa paikoissa 400 kV voimajohtojen alla ja on suurimmillaan lähellä sitä 220 kV voimajohtojen alla. Suositusarvo ei ylitä 400 kV voimajohdon johtoaukean ulkopuolella eikä muiden voimajohtojen allakaan. Työntekijöiden toimenpidetaso 10 kV/m voi laskelmien mukaan ylittyä joissakin tapauksissa alimmilla ilmajohtostandardin sallimilla vaihejohtimien korkeuksilla.

Voimajohtojen sähkökentän voimakkuuden mittaukseen hankittu mittauslaite testattiin todellisissa olosuhteissa vertaamalla sillä saatuja lukemia luotettavaksi todetun mittarin lukemiin. Samalla selvitettiin, millaisella mittausjärjestelyillä saadaan luotettavia ja toistettavia sähkökentän voimakkuuden mittaustuloksia. Suurimmaksi sähkökentän voimakkuudeksi mitattiin 400 kV voimajohdon alla 1 m korkeudella maasta 6 kV/m.

Tampereen teknillinen yliopisto (TTY) on tehnyt lukuisia sähkökentän voimakkuuden mittauksia. TTY on myös laskenut sähkökentän voimakkuuksia ja todennut mittaus- ja laskentatulosten välillä merkittäviä eroja. Ne ovat olleet paljon suurempia kuin mittauksen arvioitu epävarmuus. Erot ovat todennäköisesti johtuneet epätasaisesta

maastosta ja laskentaparametrien epävarmuudesta. Esimerkiksi johtimien korkeuden mittauksen epävarmuus on suuri. Kasvillisuus vaikuttaa merkittävästi sähkökentän voimakkuuteen. Viereinen korkea kasvillisuus pienentää sitä, ja alapuolella oleva matala kasvillisuus suurentaa sitä. TTY:n mittaama suurin sähkökentän voimakkuus on ollut 9,9 kV/m 400 kV voimajohdon alla ja vähemmän kuin 5 kV/m muiden voimajohtojen (220 kV ja 110 kV) alla.

Väestön suositusarvo 5 kV/m ei ylitä 400 kV voimajohtojen johtoaukean ulkopuolella eikä 220 kV ja 110 kV voimajohtojen alla. Laskenta- ja mittaustulosten perusteella näyttäisi siltä, että väestön suositusarvo 5 kV/m ylittyisi noin 30 %:lla pylväsväleistä 400 kV voimajohtojen alla. Mittauksilla ei ole voitu todeta, että työntekijöiden toimenpidetaso 10 kV/m ylittyisi 400 kV voimajohtojen alla. Voimajohtojen johtoalueen ulkopuolella ei suurella todennäköisyydellä synny sähkökentän aiheuttamia kivuliaita kipinäpurkauksia tai merkittävää ärsytystä iholla. 400 kV voimajohtojen alla sähkökenttä saattaa aiheuttaa kipinäpurkauksia, jotka osa ihmisistä kokee kivuliaina. Näillä ei ole muilta osin haitallisia vaikutuksia ihmisten terveyteen. Suurimmat sähkökentän voimakkuudet ovat lisäksi paikoissa, joissa oleskellaan vain satunnaisesti eikä pitkäaikaisesti. Tarvittaessa sähkökentän voimakkuutta on voitu pienentää erilaisilla teknisillä menetelmillä paikoissa, joissa ihmiset ovat kokeneet kivuliaita tuntemuksia 400 kV voimajohdon alla.

6 Kirjallisuusviitteet

El Dein AZ, Wahab MAA, Hamada MM, Emmery TH. The effects of the span configurations and conductor sag on the electric-field distribution under overhead transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2010; 25(4): 2891–2902.

Halinen S, Pulakka A, Lajunen A, Kivelä T, Sauramäki T, Keikko T, Korpinen L. Sähkökenttien vaimentaminen kasvillisuuden avulla 400 kV:n voimansiirtojohtojen alla, II osa. Julkaistu 28.2.2001. [viitattu 11.1.2017] http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/sahkokkenttien_vaimentaminen_2.pdf

ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics* 1998; 74(4): 494–522.

ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics* 2010; 99(6): 818–836.

IEC – International Electrotechnical Commission. Electric and magnetic field levels generated by AC power systems – Measurement procedures with regard to public exposure. International standard IEC 62110. Edition 1.0. Geneva: IEC; 2009.

IEC – International Electrotechnical Commission. Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings – Part 1: Requirements for measuring instruments. International standard IEC 61786-1. Edition 1.0. Geneva: IEC; 2013.

IEC – International Electrotechnical Commission. Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings – Part 2: Basic standard for measurements. International standard IEC 61786-2:2014. Edition 1.0. Geneva: IEC; 2014.

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC power lines. IEEE Std 644TM-1994. Standards Development Committee of the IEEE Electromagnetic Compatibility Society. New York: IEEE; 1994.

Keikko, T, Isokorpi, J, Korpinen, L, Elovaara, N, Vanhala, P. Considering electric and magnetic fields in electric power system design in Finland. In 2000 Session Papers, Group 36, 38th CIGRE Session, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, August 27 – September 1, Paris, France. 2000. pp. 7.

Korpinen L, Hietanen M, Jokela K, Juutilainen J, Valjus J. Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät ympäristössä. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 89/1995. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö; 1995.

Korpinen L. Yleisön altistuminen pientaajuisille sähkö- ja magneettikentille Suomessa. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:12. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö; 2003.

Korpinen LH, Kuisti HA, Tarao H, Elovaara JA. Influence of relative humidity on analyzing electric field exposure using ELF electric field measurements. *Bioelectromagnetics* 2013; 34: 414–418.

Salari JC, Mpalantinos A, Silva JI. Comparative analysis of 2- and 3-D methods for computing electric and magnetic fields generated by overhead transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2009; 24(1): 338–344.

SFS ry. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. SFS-käsikirja 603. Ilmajohtostandardit, 2. painos. Helsinki: SFS; 2016.

STMa. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistumisen rajoittamisesta 4.4.2002/294.

Voipio E. Virtapiirit ja verkot. Otakustantamo. Kolmas tarkistettu painos. ISBN 951-671-014-X. TKY. Espoo: Otapaino; 1976.